



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Università degli Studi di Padova

Facoltà di Ingegneria

tesi di laurea

Sonde di tensione: analisi di mercato e delle prestazioni attuali

Relatore: Prof. Alessandro Sona

Laureando: Garbo Francesco

A.A 2023-24

Indice

Introduzione	iii
1 Panoramica sulle sonde di tensione	1
1.1 Un semplice modello di strumento di misura	1
1.1.1 Sensori passivi e attivi	3
1.2 Connessione della sonda	4
1.2.1 Lunghezza della connessione al DUT	4
1.3 Comportamento da carico della sonda	7
2 Funzionamento delle sonde di tensione	9
2.1 Compensazione di una sonda	10
2.1.1 Cos'è la compensazione delle sonde?	10
2.1.2 Perché è necessario compensare una sonda?	10
2.1.3 Quando deve essere compensata una sonda?	10
2.1.4 Come sono compensate le sonde?	11
2.2 Come scegliere una sonda?	15
2.2.1 Categorie di sonde	15
2.2.2 Attenuazione	16
2.2.3 Banda passante	16
2.2.4 Resistenza d'ingresso	16
2.2.5 Capacità d'ingresso	17
2.2.6 Tensione d'ingresso massima	17
2.2.7 Intervallo di compensazione della sonda	17
2.2.8 Terminazione d'uscita della sonda	17
2.2.9 Misura single-ended o differenziale	17
3 La sonda Keysight N7007A	18
3.1 Metodo di analisi delle sonde	18
3.2 Analisi della sonda Keysight N7007A	19
4 Analisi delle sonde di tensione	21
4.1 Analisi delle sonde passive	22
4.2 Analisi delle sonde passive ad alto voltaggio	24
4.3 Analisi delle sonde differenziali	26
4.4 Analisi delle sonde differenziali ad alto voltaggio	28
4.5 Analisi delle sonde attive	30
4.6 Analisi delle sonde "Power Rail"	32
4.7 Analisi delle sonde logiche	34
4.8 Analisi delle sonde isolate a fibra ottica ad alto voltaggio	36

4.9	Analisi delle sonde TriMode	38
4.10	Analisi delle sonde attive InfiniiMax Ultra	40
4.11	Analisi delle sonde attive InfiniiMode	42
Conclusioni		A
Riferimenti bibliografici		B

Introduzione

Lo scopo del seguente documento è fornire al lettore le informazioni necessarie per conoscere ogni tipo di sonda di tensione e comprenderne i principali parametri, nel caso in cui si intenda procedere all'acquisto di una delle sonde analizzate.

Nel primo capitolo verranno introdotte le sonde di tensione attraverso l'argomento più generale degli strumenti di misura, in modo da definire il concetto di sonda di tensione. Successivamente verrà analizzata la problematica del collegamento della sonda ad un DUT (Device Under Test), in particolar modo, degli effetti che la lunghezza ed angolazione del collegamento esercitano sulla sonda. Per concludere sarà esaminato il comportamento da carico delle sonde di tensione.

Nel secondo capitolo sarà analizzato lo schema di un sistema sonda-oscilloscopio, dove la sonda è passiva ad alta impedenza con rapporto di attenuazione 10:1. Di seguito verrà spiegata la compensazione di una sonda, analizzando cos'è, perché è necessaria, quando va effettuata e come si mette in pratica il processo di compensazione. Per finire verranno suddivise le sonde in macrocategorie e analizzati i principali parametri.

Nel terzo capitolo sarà presa in esame la sonda Keysight N7007A come caso di studio, in modo tale da introdurre la metodologia di analisi delle sonde, la quale verrà ampiamente considerata nel capitolo successivo.

Nel quarto capitolo verranno analizzate diverse categorie di sonde e sarà fatto un confronto tra sonde di varie aziende produttrici attraverso parametri comuni ai datasheet. Naturalmente non possono essere confrontate tutte le sonde presenti sul mercato, quindi verrà regolamentato questo tema introducendo il limite di sei sonde per categoria. Un altro punto fondamentale sarà l'analisi di mercato sulle sonde di tensione, dove si vedranno i prezzi delle sonde per ogni categoria (dove possibile), con annessa una descrizione delle loro applicazioni e caratteristiche.

La tesi si concluderà analizzando i risultati di questo studio e la procedura per un ulteriore approfondimento dell'argomento.

1 Panoramica sulle sonde di tensione

Nell'affrontare problematiche di misura è spesso utile adottare una modellizzazione del processo di misurazione.

In termini astratti, uno "strumento di misura" è un dispositivo che trasforma una variabile fisica (il misurando) in una forma adatta alla registrazione (la misura). E' comune utilizzare un sistema standard di unità con cui la misura di uno strumento può essere comparata con la misura di un altro strumento. Un esempio di strumento è il righello. In questo caso, il misurando è la lunghezza di un oggetto e la misura è il numero di unità che rappresenta la lunghezza [1].

1.1 Un semplice modello di strumento di misura

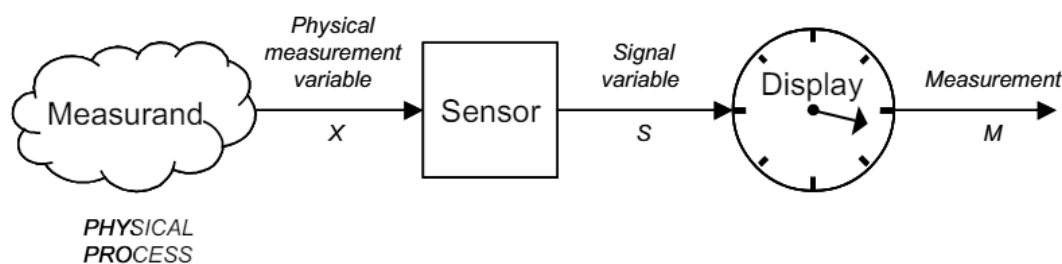


Figura 1: Schema di un modello di strumento di misura [1].

In Fig. 1 è rappresentato un modello generalizzato di un semplice strumento di misura. Nella parte sinistra dell'immagine sono presenti il processo fisico da misurare e il misurando, il quale è rappresentato da una variabile fisica X . Circonstanza importante è che la variabile X non deve necessariamente coincidere con il misurando, ma è necessario che abbia una qualunque relazione con esso. Come esempio si utilizza il processo di misurazione della massa. In questo processo, il misurando è la massa, mentre la variabile fisica di misura è la forza verticale che la massa esercita nel campo gravitazionale della Terra.

Physical quantity	Unit	Symbol
Fundamental quantities		
Length	metre	m
Mass	kilogram	kg
Time	second	s
Electric current	ampere	A
Temperature	kelvin	K
Luminous intensity	candela	cd
Amount of substance	mole	mol
Supplementary quantities		
Plane angle	radian	rad
Solid angle	steradian	sr

Figura 2: Alcune tra le più comuni variabili fisiche e le loro unità di misura [2].

L'elemento chiave del modello di uno strumento di misura rappresentato in Fig. 1 è il sensore, il quale ha la funzione di convertire la variabile fisica d'ingresso, come quelle rappresentate in Fig. 2, in una variabile d'uscita. I segnali hanno la caratteristica di essere manipolabili in un sistema di trasmissione, un circuito meccanico o elettrico. Come conseguenza di questo, il segnale può essere trasmesso ad un'uscita oppure ad uno strumento di registrazione, il quale può essere distante dal sensore. Nei circuiti elettrici la tensione è uno dei segnali principali.

In uno strumento generico, il segnale è trasmesso ad un dispositivo di visualizzazione o registrazione, dove la misura può essere letta. L'uscita osservata è la misura M . Il segnale può essere anche usato direttamente da un sistema più grande, del quale lo strumento fa parte. Per esempio, il segnale d'uscita del sensore potrebbe essere usato come segnale d'ingresso di un sistema di controllo a catena chiusa.

Nel caso in cui il segnale d'uscita del sensore fosse troppo piccolo, esso va amplificato. L'uscita amplificata può essere trasmessa al dispositivo di visualizzazione o registrata in base all'applicazione. In molti casi è necessario che lo strumento fornisca un segnale d'uscita digitale, in modo che si possa interfacciare con un sistema di acquisizione dati oppure un sistema di comunicazione. Se il sensore non fornisce un'uscita digitale, l'uscita analogica viene convertita in digitale attraverso un ADC, cioè un convertitore analogico-digitale. Il segnale digitale è tipicamente trasmesso ad un PC (Personal Computer), il quale può visualizzare, immagazzinare o trasmettere i dati [1].

1.1.1 Sensori passivi e attivi

I sensori sono anche trasduttori ovvero sono dispositivi che convertono energia d'ingresso da una forma a energia d'uscita in un'altra forma. I sensori possono essere divisi in due grandi classi in base a come interagiscono con l'ambiente di misurazione. I sensori passivi non aggiungono energia durante la misurazione, ma potrebbero ridurla durante il loro utilizzo. Un esempio di sensore passivo è la termocoppia, la quale converte una temperatura fisica in una tensione. In questo caso, il gradiente di temperatura dell'ambiente genera una tensione termoelettrica, la quale è il segnale d'uscita. I sensori attivi aggiungono energia all'ambiente di misurazione. Un esempio di sensore attivo è un sistema radar oppure sonar, dove la distanza da un determinato oggetto è misurata inviando onde radio (radar) o acustiche (sonar), le quali rimbalzano sull'oggetto in questione [1].

1.2 Connessione della sonda

Una catena di misurazione è composta dalla combinazione di un sistema di acquisizione dati, una sonda e i suoi accessori. L'anello debole nella catena determina la prestazione del sistema di misurazione. Anche un potente sistema di acquisizione dati, che possiede i requisiti che si cercano per una determinata misurazione, potrebbe non essere sufficiente. Un anello relativamente debole, come un pessimo accessorio di punta della sonda, può peggiorare significativamente la prestazione di banda del sistema [3].

1.2.1 Lunghezza della connessione al DUT

La lunghezza del collegamento dei fili alla sonda ha un notevole impatto sulla banda passante del segnale misurato.

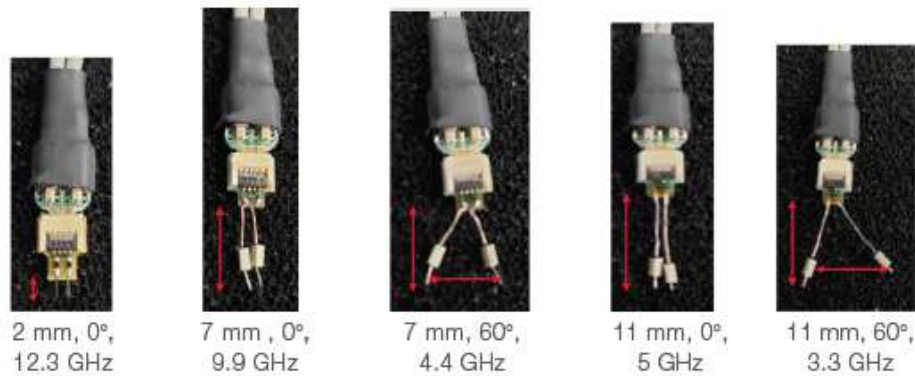


Figura 3: Influenza dell'area dei fili collegati alla sonda sulla banda passante [3].

L'immagine raffigurata in Fig. 3, rappresenta l'influenza dell'area dei fili collegati sulla banda passante e dimostra che, aumentando la lunghezza dei fili di 9 mm e l'angolazione 60 gradi, la banda passante del sistema si abbassa fino a raggiungere un quarto della sua banda originale di 12 GHz.

Utilizzare fili più lunghi risulta utile per misurare due punti fisicamente separati in modo semplice, anche se, per quanto riguarda le prestazioni, questo metodo può risultare svantaggioso.

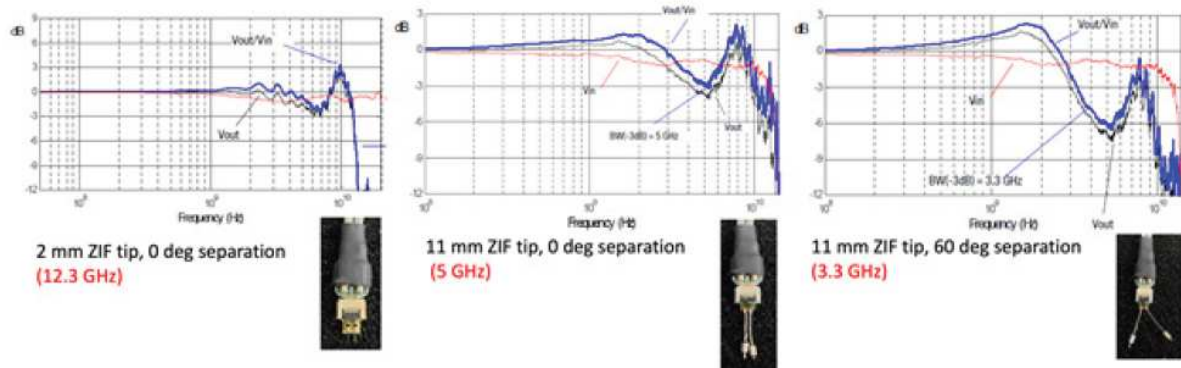


Figura 4: Influenza della lunghezza e angolazione dei fili sulla risposta in frequenza del DUT [3].

In Fig. 4, si può osservare la risposta in frequenza dell'accessorio di punta ZIF (Keysight). All'aumentare della lunghezza e dell'angolazione del collegamento al DUT, non solo la banda passante della sonda diminuisce, anche la risposta in frequenza diventa meno piatta e più irregolare.

Un altro elemento importante da considerare è l'effetto che ha il metodo di collegamento della sonda al DUT sul comportamento da carico di quest'ultima.

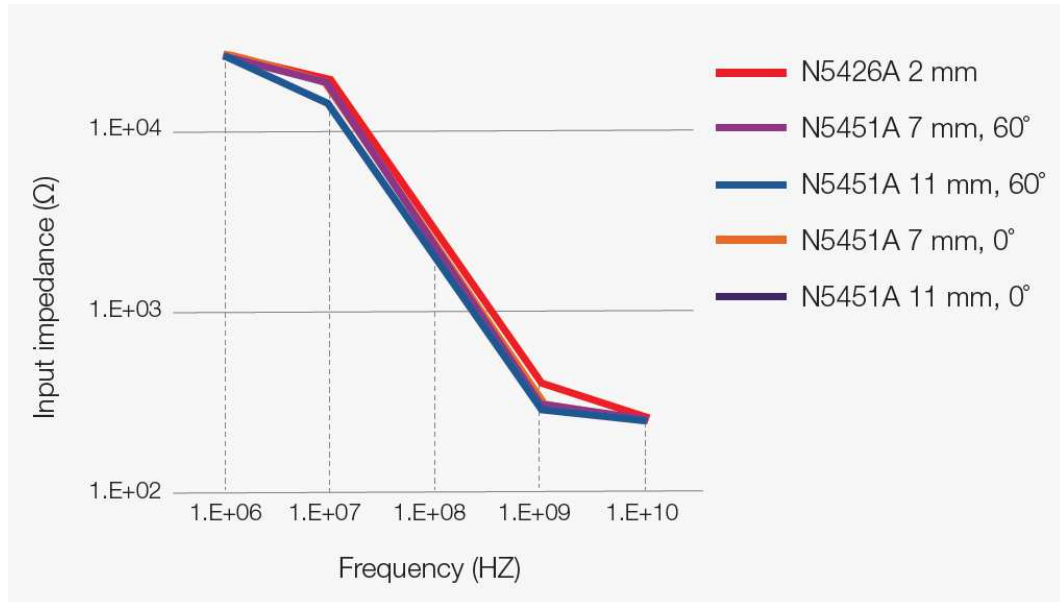


Figura 5: Effetto di diversi metodi di collegamento della sonda al DUT sul comportamento da carico della sonda [3].

In Fig. 5 è tracciato l'andamento dell'impedenza d'ingresso della sonda (asse verticale), in funzione della frequenza (asse orizzontale) prendendo in esame l'accessorio di punta ZIF (Keysight). Si può notare che, al diminuire della lunghezza e angolazione del collegamento al DUT, l'impedenza d'ingresso aumenta. Questo determina un comportamento da carico meno marcato da parte della sonda [3].

1.3 Comportamento da carico della sonda

Quando si connette una sonda di tensione ad un circuito, quest'ultima diventa parte del circuito preso in esame e le sue caratteristiche elettriche hanno un impatto sulla prestazione della misurazione. Questi effetti possono degradare l'accuratezza della misurazione in quanto il nuovo circuito, che include anche la sonda, si comporterà in modo diverso dal circuito senza la sonda connessa. Questo è soprattutto vero quando si effettuano misurazioni per segnali ad alta frequenza.

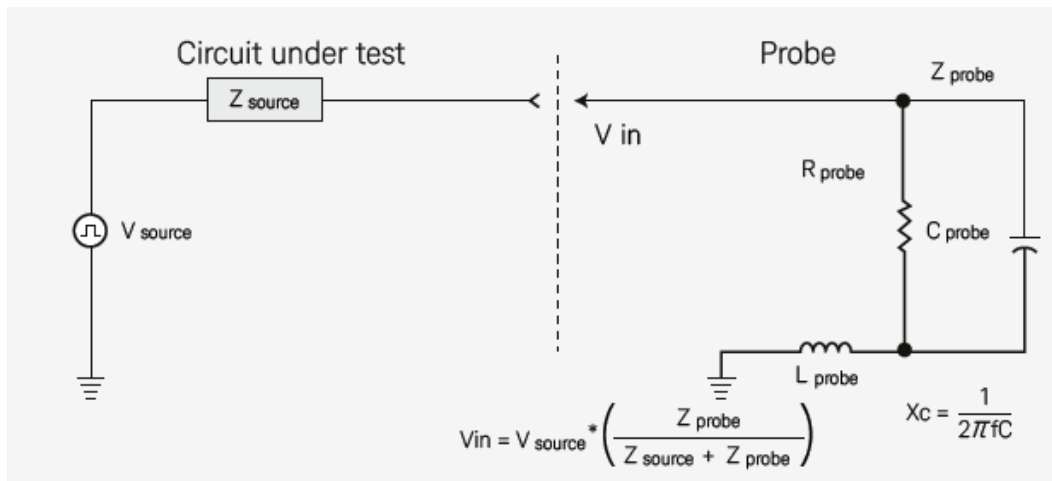


Figura 6: Rappresentazione di come le componenti resistive, capacitive e induttive della sonda possono modificare il comportamento del circuito testato [3].

La Fig. 6 dimostra che la sonda ha un effetto sul circuito sul quale si esegue una misurazione attraverso le sue 3 componenti: resistiva, capacitiva e induttiva. La sfida è accertarsi che queste componenti rimangano all'interno di intervalli accettabili. La componente resistiva è solitamente la meno problematica, a condizione di utilizzare una sonda passiva ad alta impedenza per effettuare misurazioni su segnali a bassa frequenza. Il più grande effetto del carico resistivo è dato dal partitore di tensione, come riportato nella Fig. 6, tra resistenza d'uscita del circuito e resistenza d'ingresso della sonda. Più la resistenza della sonda ha un valore inferiore rispetto a quello della resistenza del circuito, più il comportamento da carico della sonda diminuirà l'ampiezza del segnale misurato.

A 0 Hz, la resistenza della sonda determina l'impedenza d'ingresso e le caratteristiche del suo comportamento da carico, mentre la reattanza capacitiva (X_c) non contribuisce alla misurazione in quanto è infinita. All'aumentare della frequenza la reattanza capacitiva diminuisce e diventa la maggior fonte di comportamento da carico della sonda.

Se si effettua una misurazione del circuito, c'è la possibilità di poter osservare un'oscillazione del segnale. La causa può essere attribuita al circuito oppure al collegamento della sonda. Il comportamento da carico causato dall'induttanza appare solitamente sotto forma di oscillazioni nel segnale osservato. La fonte dell'oscillazione è il circuito di risonanza LC, il quale è compreso dalla capacità interna della sonda, la capacità della punta della sonda e l'induttanza collegata a massa. Cambiando semplicemente il connettore della sonda (alligator clip), con un cavo di lunghezza minore, potrebbe cambiare il segnale visualizzato. Se succedesse quanto appena affermato, il problema potrebbe riguardare il carico induttivo e non il circuito [3].

2 Funzionamento delle sonde di tensione

Le sonde di tensione sono composte da un puntale, un cavo coassiale e un connettore BNC. Questi sono essenzialmente un involucro di materiale isolante da impugnare, una punta metallica ed un collegamento a massa. una sonda di tensione generica, come sistema di misura, può essere descritta attraverso l'immagine seguente:

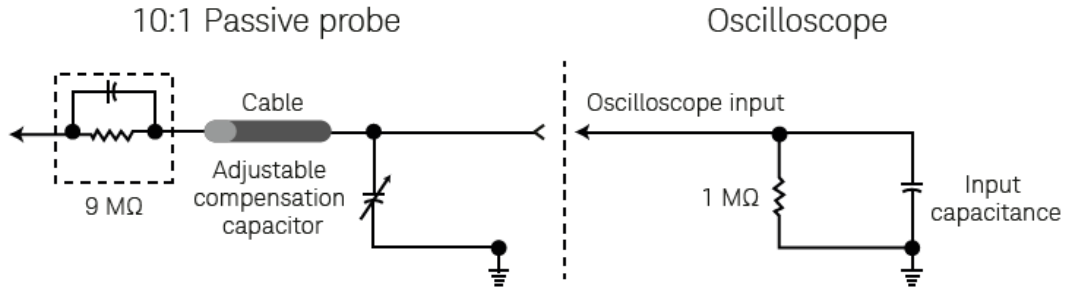


Figura 7: Schema semplificato di una sonda passiva ad alta impedenza con rapporto di attenuazione 10:1 [4].

Nella Fig. 7 si può notare come la resistenza della punta della sonda è di $9\text{ M}\Omega$, la quale forma un partitore resistivo 10:1 insieme alla resistenza di $1\text{ M}\Omega$ dell'ingresso dell'oscilloscopio. L'oscilloscopio è invece descritto semplicemente come il parallelo tra una resistenza ed una capacità. Il segnale in ingresso alla sonda è attenuato di un fattore 10:1. Per esempio, se si misura un segnale a 10 V , questa sonda permette di osservare un segnale di 1 V nell'oscilloscopio. La punta della sonda è seguita da un cavo ad alta impedenza. Lo schema di Fig. 7 non tiene conto dei numerosi fattori di non idealità che rendono il passaggio del segnale non perfetto come capacità parassite, autoinduttanza del ground wire loop e rumore captato dal ground wire loop [5].

2.1 Compensazione di una sonda

Come si è visto nella Fig. 7, l'ingresso dell'oscilloscopio è descritto attraverso il parallelo tra una resistenza ed una capacità. Nella maggior parte dei casi questa è dell'ordine di poche decine di picofarad. Quando si misura a 0 Hz questa capacità non è un problema, ma con l'aumentare della frequenza quest'ultima, insieme alla resistenza, inizia a comportarsi come un filtro passa basso.

2.1.1 Cos'è la compensazione delle sonde?

La compensazione delle sonde è quel processo con il quale si regola la capacità interna, in modo da allargare la larghezza di banda del sistema di misurazione, a discapito di un'attenuazione non trascurabile dell'ampiezza del segnale d'ingresso. La corretta compensazione delle sonde è necessaria per garantire la migliore accuratezza e linearità possibile nei risultati di misura.

2.1.2 Perché è necessario compensare una sonda?

Una sonda non compensata oppure mal compensata causa un paio di problemi di rilievo. Il primo è la rappresentazione errata sull'oscilloscopio dell'ampiezza del segnale misurato. Confrontando una misura effettuata con una sonda correttamente compensata, con misure effettuate con una sonda sottocompensata o sovracompensata, si nota una significativa variazione di ampiezza anche a basse frequenze. Il secondo problema è la distorsione del segnale misurato, più precisamente la variazione dei tempi di salita e discesa dei segnali a impulsi. Per finire è importante ricordare che questi problemi s'aggravano con l'aumentare della frequenza.

2.1.3 Quando deve essere compensata una sonda?

Le sonde devono essere compensate prima di effettuare la misura, altrimenti si potrebbe incappare nei problemi descritti in precedenza. Dal momento che gli oscilloscopi hanno valori di capacità d'ingresso che variano in base al costo, al costruttore e al modello, le sonde vanno compensate ogni volta che vengono riutilizzate su di un altro oscilloscopio. L'utilizzo di connettori diversi solitamente non crea problemi. La compensazione, inoltre, diventa più importante all'aumentare della frequenza del segnale.

2.1.4 Come sono compensate le sonde?

La maggior parte degli oscilloscopi hanno un generatore di onde quadre incorporato, il quale solitamente funziona ad una frequenza di 1 kHz.

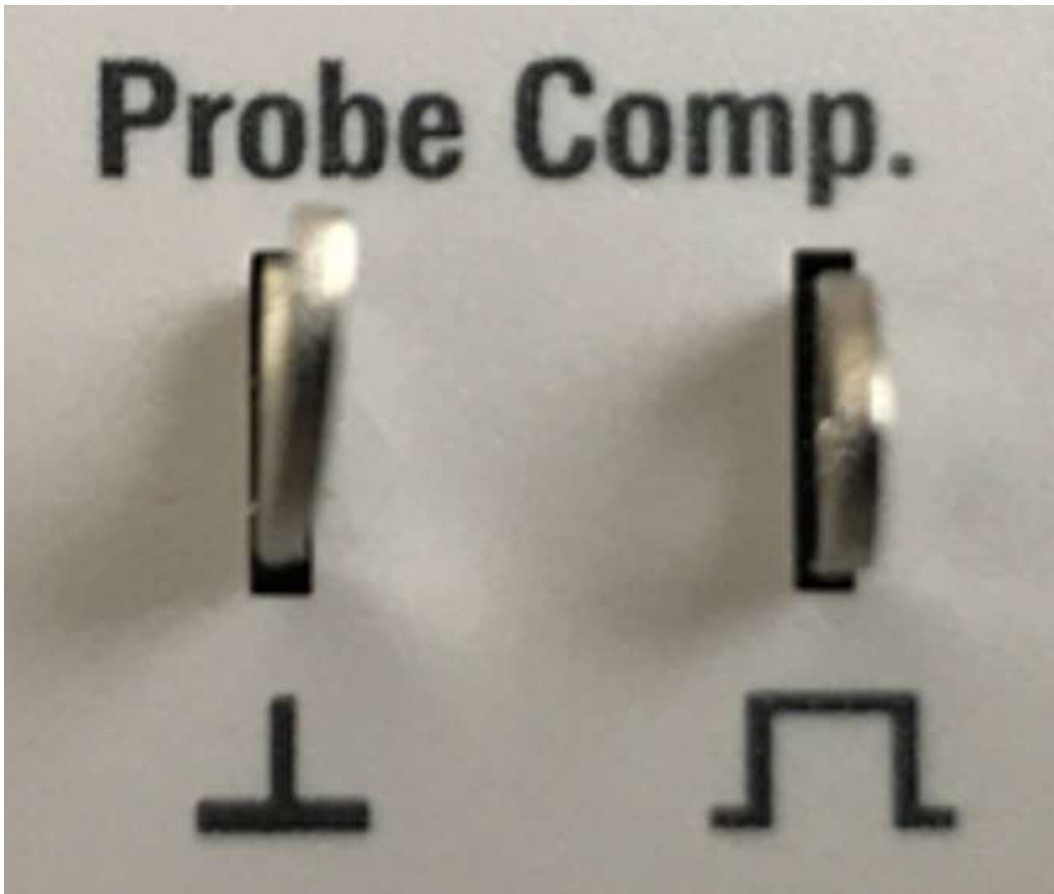


Figura 8: Piedini di sorgente onda quadra e massa per la compensazione delle sonde [6].

Di solito, come rappresentato in Fig. 8, il generatore di onde quadre è indicato sull'oscilloscopio come "probe compensation" e/o indicato da un simbolo di onda quadra e massa.



Figura 9: Metodo di connessione della sonda per la compensazione [6].

La punta della sonda si collega alla sorgente di onda quadra, mentre la massa della sonda si collega a massa, come visualizzato in Fig. 9.



Figura 10: Operazione di compensazione della sonda con un cacciavite antistatico [6].

Successivamente si utilizza un cacciavite antistatico oppure un elemento non conduttivo per regolare la capacità, come rappresentato nella Fig. 10, fino a quando il segnale sull'oscilloscopio si avvicina il più possibile ad un'onda quadra o rettangolare.

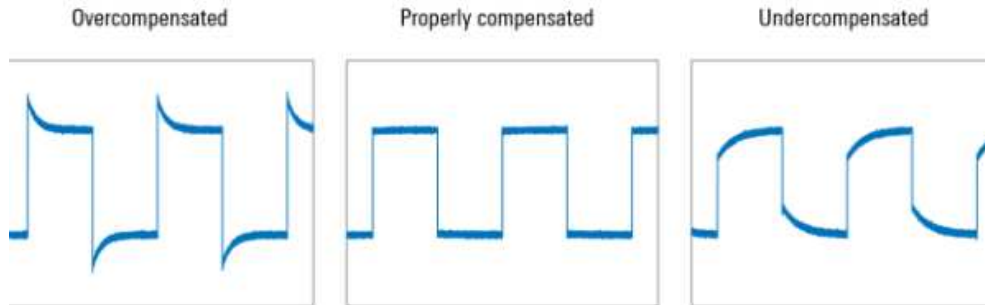


Figura 11: Conseguenza di ogni tipo di compensazione [6].

Una sonda è correttamente compensata quando la parte superiore del segnale di compensazione è essenzialmente orizzontale. Le sonde sovracompenstate creano una sovralongazione (overshoot) sul fronte di salita del segnale, mentre le sonde sottocompenstate causano una sottoelongazione (undershoot) sul fronte di salita. Queste casistiche sono rappresentate in Fig. 11. Nel caso di sonde sottocompenstate o sovracompenstate, il condensatore di compensazione è regolato fino a quando la forma d'onda ha dei bordi quadrati. Questa operazione, di solito, richiede solo una frazione esigua di un giro. Dallo schema di Fig. 11 si nota che, per la compensazione, vengono utilizzate onde quadre o rettangolari, in quanto possiedono componenti sia di alta che di bassa frequenza [6].

2.2 Come scegliere una sonda?

2.2.1 Categorie di sonde

In generale, le sonde possono essere divise in 3 macrocategorie: sonde passive ad alta impedenza, sonde passive a bassa impedenza e sonde attive. Ognuna di queste offre dei vantaggi e svantaggi che vanno tenuti in considerazione quando si va a scegliere quale sonda utilizzare.

Probe Type	Typical Useful Frequency Range	Typical Maximum Input Voltage
Passive, High Impedance (1 MOhm)	0 to 50 MHz	600 Volts
Passive, Low Impedance (500 Ohms)	0 to 8 GHz	20 Volts
Active	0 to 2 GHz	10 Volts

Figura 12: Schema con tipi di sonde, intervalli utilizzabili di frequenza e tensione d'ingresso [7].

In Fig. 12 sono riportati gli intervalli di frequenza per cui le sonde sono utili e le tensioni d'ingresso massime. Sfortunatamente conoscere solamente i parametri qui sopra riportati non è sufficiente per effettuare una scelta in base all'applicazione. Ci sono altri parametri come impedenza, capacità e banda passante, i quali hanno un effetto considerevole sulla prestazione della sonda [7].

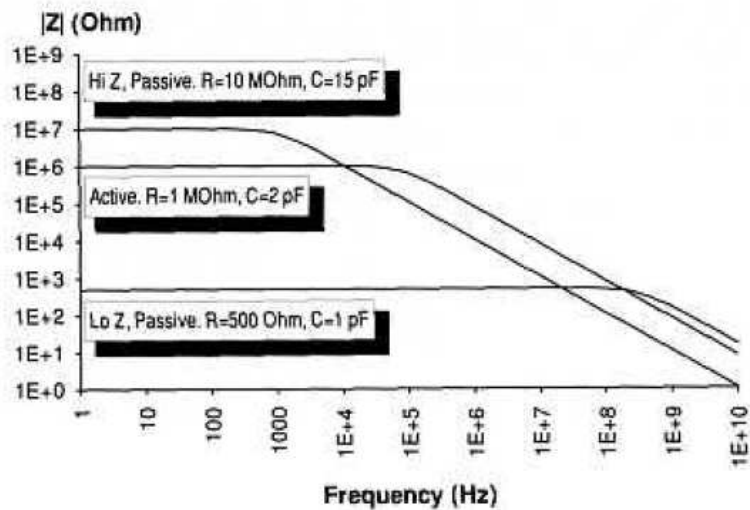


Figura 13: Grafico che mette in relazione l'impedenza delle diverse categorie di sonde con la frequenza [7].

In Fig. 13 è possibile osservare un grafico che rappresenta l'andamento delle impedenze delle diverse sonde in funzione della frequenza.

2.2.2 Attenuazione

Per accoppiare l'ampiezza del segnale misurato con l'intervallo di sensibilità verticale bisogna scegliere il rapporto di attenuazione (1:1, 10:1, 100:1, 1000:1). Una sonda a maggiore attenuazione permette all'intervallo di misura dello strumento di estendersi. Sonde con attenuazione minore permettono di effettuare misure con minor rumore [8].

2.2.3 Banda passante

La banda passante della sonda deve coincidere con quella dell'oscilloscopio ed essere idonea al segnale da misurare. Ad alte frequenze l'induttanza del cavo di terra e la capacità d'ingresso influenzano di più le prestazioni della sonda rispetto alla banda passante [8].

2.2.4 Resistenza d'ingresso

L'impedenza d'ingresso è usata per descrivere il comportamento da carico della sonda. Per frequenze nulle o quasi, la componente resistiva del carico è quella che incide maggiormente sul comportamento da carico. Quando la frequenza cresce, la

capacità della punta della sonda in parallelo alla resistenza, diminuisce l'impedenza d'ingresso della sonda con conseguente aumento del comportamento da carico [8].

2.2.5 Capacità d'ingresso

Una capacità d'ingresso elevata rallenta la risposta del sistema al segnale d'impulso. Generalmente una capacità d'ingresso di basso valore è migliore [8].

2.2.6 Tensione d'ingresso massima

Solitamente viene selezionata una sonda che sopporta una tensione più alta di quella da misurare, questo per evitare danni alla stessa, per garantire la sicurezza di chi la utilizza e per proteggere l'ingresso dell'oscilloscopio da tensioni dannose [8].

2.2.7 Intervallo di compensazione della sonda

La maggior parte delle sonde passive hanno una specifica che riporta l'intervallo di capacità d'ingresso dell'oscilloscopio sul quale possono essere usate. Se non si rispetta questa specifica, non si è più in grado di adattare la sonda per ottenere un'onda quadra correttamente compensata [8].

2.2.8 Terminazione d'uscita della sonda

La maggioranza degli oscilloscopi hanno resistenza d'ingresso da 1 M Ω e/o 50 Ω . Per l'integrità e per il trasferimento ottimale del segnale è importante che resistenza e capacità della sonda corrispondano a resistenza e capacità dell'oscilloscopio con cui si visualizza la misura [8].

2.2.9 Misura single-ended o differenziale

Le sonde differenziali misurano la differenza di tensione tra due punti qualsiasi di input a differenza delle sonde single-ended, le quali misurano la tensione d'ingresso riferita a massa. Le sonde differenziali sono solitamente utilizzate per misure di segnali ad alta frequenza o segnali dove nessuno dei due punti di misura sono riferiti a terra. Una sonda differenziale può essere usata per effettuare misure single-ended utilizzando il suo input negativo come riferimento a massa [8].

3 La sonda Keysight N7007A

3.1 Metodo di analisi delle sonde

Prima di procedere con l'analisi della sonda Keysight N7007A bisogna introdurre il modo in cui le sonde verranno analizzate in questo documento.

Per iniziare viene fatta una breve introduzione che riguarda le caratteristiche generali e le applicazioni della sonda e/o categoria di sonde.

Successivamente viene mostrata un'immagine della sonda in modo da vedere quali sono le differenze estetiche e superficiali tra diverse sonde.

Si inserisce una tabella dove si confrontano sonde della stessa categoria attraverso parametri comuni ai loro datasheet come: banda passante, impedenza d'ingresso, massimo input, tempo di salita, attenuazione, rapporto di reiezione di modo comune e tanti altri parametri.

Si analizza la tabella vista in precedenza, osservando le differenze tra le varie sonde.

Per concludere si espongono i prezzi delle sonde analizzate (dove possibile).

3.2 Analisi della sonda Keysight N7007A

La sonda passiva Keysight N7007A riportata in Fig. 14 è una sonda a costo ridotto, ad alta impedenza, con punte robuste per misurazioni tra -40 e $+85^{\circ}\text{C}$. Questa sonda è ideale per un vasto intervallo di applicazioni a temperatura estrema; è composta da un'alta impedenza d'ingresso ($10\text{ M}\Omega$ a 0 Hz) e presenta un ampio intervallo di tensione d'ingresso (1000 V a 0 Hz) [9].



Figura 14: Sonda passiva ad alta temperatura Keysight N7007A [9].

	Keysight N7007A
Banda passante [Hz]	400 MHz
Rapporto di attenuazione	10:1
Intervallo di compensazione dell'oscilloscopio [F]	da 6 a 18 pF
Intervallo di temperatura di utilizzo [°]	da -40 a +85°C
Massimo intervallo d'ingresso [V]	1 kV CAT II, 600 V CAT III
Lunghezza del cavo [m]	2 m
Impedenza d'ingresso in corrente continua [Ω , F]	15.5 pF e 10 M Ω con terminazione a 1 M Ω

Tabella 1: Parametri principali della sonda passiva ad alta temperatura N7007A [9].

In Tab. 1 è possibile osservare tutti i parametri della sonda in esame. Il parametro più rilevante è sicuramente l'intervallo di temperatura di utilizzo, il quale ne permette l'uso in ambienti a temperature estreme. Nella tabella CAT II e CAT III sono riferiti rispettivamente ai carichi in corrente alternata monofase (CAT II) e distribuzione trifase (CAT III).

Per quanto riguarda il prezzo, questa sonda si aggira sui 750 €.

4 Analisi delle sonde di tensione

Prima di poter confrontare le sonde in esame, è utile definire delle categorie, in quanto permette di confrontare sonde della stessa categoria tra loro.

Queste categorie sono:

- Sonde passive
- Sonde passive ad alto voltaggio
- Sonde differenziali
- Sonde differenziali ad alto voltaggio
- Sonde attive
- Sonde "Power Rail"
- Sonde logiche

Oltre a queste categorie verranno prese in esame alcune sonde tecnologicamente avanzate, uniche sul mercato e differenti per ogni azienda produttrice come:

- Sonda Teledyne LeCroy HVFO108
- Sonda Tektronix TDP7710
- Sonda Keysight InfiniiMax Ultra
- Sonda Keysight N2751A

4.1 Analisi delle sonde passive

Le sonde passive, come quella in Fig. 15, possiedono generalmente buone prestazioni, sono economiche e adatte a molteplici tipi di misurazioni. Considerato il fatto che le sonde passive non hanno bisogno di essere alimentate per funzionare, a differenza delle sonde attive, esse non dissipano potenza. Sono, solitamente, incluse in ogni oscilloscopio, di conseguenza sono molto comuni. La maggior parte delle sonde passive sono intercambiabili tra oscilloscopi, anche se le loro prestazioni sono differenti.

Queste sonde sono molto semplici da usare, serve anzitutto effettuare la compensazione, successivamente collegare il connettore all'oscilloscopio, il cavo di massa all'oscilloscopio e la sonda è pronta per effettuare la misura.



Figura 15: Sonda passiva Agilent 10074C [10].

	Banda passante [Hz]	Impedenza d'Ingresso [Ω ,F]	Massimo Input [V]
Agilent 10073C	500 MHz	2.2 M Ω , 12 pF	500 V
Keysight N2894A	700 MHz	10 M Ω , 9.5 pF	400 V
Rohde-Schwarz RT-ZP11	700 MHz	10 M Ω , 9.5 pF	400 V
Tektronix P6139B	700 MHz	2.2 M Ω , 12 pF	500 V
Teledyne LeCroy PP007-WR	700 MHz	2.2 M Ω , 12 pF	500 V
Yokogawa 701949	700 MHz	2.2 M Ω , 12 pF	500 V

Tabella 2: Confronto tra alcune delle migliori sonde passive di diverse aziende, attraverso parametri comuni ai loro datasheet [10] [9] [11] [12] [13] [14].

Nella Tab. 2 si possono osservare sonde passive di 6 aziende diverse confrontate attraverso banda passante, impedenza d'ingresso e massimo input. Come si nota, i valori dei parametri sono molto simili tra loro, nonostante siano prodotte da aziende differenti.

Considerato il fatto che le sonde passive hanno molteplici utilizzi, il prezzo di queste varia molto in base all'applicazione per il quale sono state costruite. Di conseguenza il costo di una sonda passiva non molto performante si aggira sui 50 €(Tektronix TPP0051), mentre la migliore può arrivare a superare i 1000 €(Tektronix TPP1000) [15].

4.2 Analisi delle sonde passive ad alto voltaggio

Questa categoria di sonde, come riportato nella Fig. 16, condivide quasi tutti i parametri delle sonde passive. L'unica differenza con le sonde passive generiche è il fatto che queste misurano tensioni elevate, le quali vengono ridotte fino a voltaggi misurabili grazie al circuito divisore di tensione [16].



Figura 16: Sonda passiva ad alto voltaggio Tektronix [17].

	Banda passante [Hz]	Tempo di salita [s]	Attenuazione	Massimo Input [V]
Agilent N2771A	50 MHz	7 ns	1000:1	15 kV in corrente continua
Keysight 10076C	500 MHz	0.7 ns	100:1	2.65 kV in corrente continua
Rohde-Schwarz RT-ZH11	400 MHz	0.9 ns	1000:1	1 kV (efficaci)
Tektronix P6015A	75 MHz	4 ns	1000:1	20 kV
Teledyne LeCroy HVP120	400 MHz	0.9 ns	100:1	6 kV

Tabella 3: Confronto tra alcune delle migliori sonde passive ad alto voltaggio di alcune aziende, attraverso parametri comuni ai loro datasheet [10] [9] [18] [17] [19].

Dalla Tab. 3 si possono osservare 5 diverse sonde confrontate tra loro attraverso banda passante, tempo di salita, attenuazione e massimo input. A differenza della Tab. 2 si può notare come ogni azienda abbia progettato questa categoria di sonde in modo diverso, favorendo alcuni parametri rispetto ad altri.

4.3 Analisi delle sonde differenziali

Le sonde differenziali, come quella riportata nella Fig. 17, sono di notevole importanza in quanto sono le uniche in grado di misurare segnali differenziali, i quali sono in particolar modo utilizzati a frequenze di clock elevate per sopprimere le interferenze di modo comune e per trasmettere segnali a banda larga [20].



Figura 17: Sonda differenziale Yokogawa 701925 [21].

	Banda passante [Hz]	Input differenziale [V]	Impedenza differenziale [Ω , F]
Keysight N2819A	800 MHz	15 V (massimo)	200 k Ω , 1 pF
Rohde-Schwarz RT-ZD40	5.5 GHz	10 V	1 M Ω , 0.4 pF
Tektronix TDP4000	4 GHz	2 V	100 k Ω , 0.3 pF
Teledyne LeCroy D620APB2	6 GHz	7.5 V	200 k Ω , X
Yokogawa 701925	500 MHz	25 V	1 M Ω , 1.1 pF

Tabella 4: Confronto tra alcune delle migliori sonde differenziali di varie aziende, attraverso parametri comuni ai loro datasheet. Il segno X sull'impedenza indica che il dato non è fornito nel datasheet [22] [23] [24] [25] [21].

Nella Tab. 4 si possono osservare 5 diverse sonde differenziali distinte per azienda produttrice e confrontate tra loro attraverso banda passante, input e impedenza differenziale. Come si può osservare, le diverse aziende in analisi, hanno adottato politiche aziendali differenti ritenendo prioritari alcuni parametri rispetto ad altri.

4.4 Analisi delle sonde differenziali ad alto voltaggio

Questa categoria di sonde, come riportato in Fig. 18, condivide quasi tutte le caratteristiche delle sonde differenziali, tranne il fatto che sono utilizzate per misurazioni di tensioni elevate.



Figura 18: Sonda differenziale ad alto voltaggio Tektronix [26].

	Banda passante [Hz]	Impedenza differenziale [Ω , F]	Rapporto di reiezione di modo comune [dB]	Massimo input differenziale [V]
Keysight DP0001A (ad attenuazione 50:1)	400 MHz	10 M Ω , 2 pF	45 dB a 100 MHz	200 V
Rohde-Schwarz RT-ZD08	800 MHz	200 k Ω , 1 pF	15 dB da 100 Hz a 500 MHz	15 V
Tektronix THDP0100	100 MHz	40 M Ω , 2.5 pF	26 dB a 100 MHz	600 V (ad attenuazione 100:1)
Teledyne LeCroy HVD3605A	100 MHz	48 M Ω , 2.5 pF	30 dB a 100 MHz	700 V (a bassa attenuazione)
Yokogawa 701977	50 MHz	52 M Ω , 10 pF	50 dB a 1 MHz	5000 V (efficaci) o 7000 V (picco-picco)

Tabella 5: Confronto tra alcune delle migliori sonde differenziali ad alto voltaggio di diverse aziende, attraverso parametri comuni ai loro datasheet [9] [18] [26] [27] [28].

In Tab. 5 si possono osservare 5 sonde di aziende diverse confrontate tra loro attraverso banda passante, impedenza differenziale, rapporto di reiezione di modo comune e massimo input differenziale. Come si nota, tra i vari parametri spicca il massimo input differenziale di 15 V della sonda Rohde & Schwarz RT-ZD08, decisamente inferiore agli altri, come anche la sua impedenza differenziale, sempre decisamente inferiore rispetto alle altre.

Questi tipi di sonda possono costare da un minimo di 1000 €(Keysight N2791A) fino ad un massimo di circa 8500 €(Tektronix P6251) [29] [30].

4.5 Analisi delle sonde attive

In questa categoria di sonde, come riportato nella Fig. 19, è spesso richiesta un'alta fedeltà nel riportare i segnali ad alta frequenza. Le sonde passive offrono, attraverso resistenze e capacità interne di valore elevato, un'ottima risposta alle basse frequenze. Non si può dire altrettanto alle altre frequenze, in quanto hanno un effetto da carico significativo, il quale modifica il segnale di partenza [31].



Figura 19: Sonda attiva Tektronix P7240 [32].

	Banda passante [Hz]	Impedenza di input [Ω , F]	Intervallo di input [V]	Attenuazione
Keysight 1134B	7 GHz	25 k Ω , 0.44 pF	± 2.5 V	10:1
Rohde-Schwarz RT-ZS60	6 GHz	1 M Ω , 0.3 pF	8 V	10:1
Tektronix P7240	4 GHz	20 k Ω , 1 pF	2 V	5:1
Teledyne LeCroy ZS4000	4 GHz	1 M Ω , 0.6 pF	8 V	10:1
Yokogawa 700939	900 MHz	2.5 M Ω , 1.8 pF	± 10 V	10:1

Tabella 6: Confronto tra alcune delle migliori sonde attive di diverse aziende, attraverso parametri comuni ai loro datasheet [9] [23] [32] [33] [34].

Nella Tab. 6 si osservano le sonde confrontate attraverso banda passante, impedenza d'input, intervallo d'input e attenuazione. Un'osservazione può essere fatta per le impedenze d'input delle sonde Keysight 1134B e Tektronix P7240, le quali sono decisamente inferiori alle altre per quanto riguarda la parte resistiva dell'impedenza. Un altro parametro da notare è la banda passante della sonda Yokogawa 700939, la quale è l'unica inferiore ad 1 GHz.

I prezzi di queste sonde variano molto, partendo da circa 1600 € (Keysight N2795A), per arrivare anche a 12000 € (Keysight 1134B) [35] [36].

4.6 Analisi delle sonde "Power Rail"

Le tradizionali applicazioni per integrità di potenza utilizzano solitamente sonde passive o differenziali per misurare i power rail. Attualmente le applicazioni richiedono maggiore precisione nella rilevazione delle ondulazioni della tensione, con transizioni che arrivano fino a multipli GHz. Le nuove sonde in questione, come quella riportata in Fig. 20, offrono una minimizzazione del rumore ed una banda più ampia, in modo da misurare un intervallo maggiore con la massima precisione [37].



Figura 20: Sonda "Power Rail" [38].

	Banda passante [Hz]	Intervallo di Offset [V]	Intervallo di input [V]	Attenuazione
Keysight N7024A	6 GHz	± 15 V	± 0.6 V	1.3:1
Rohde-Schwarz RT-ZPR40	4 GHz	± 60 V	± 0.85 V	1:1
Tektronix TPR4000	4 GHz	± 60 V	± 1 V	1.25x
Teledyne LeCroy RP4060	4 GHz	± 60 V	± 0.8 V	1.2x

Tabella 7: Confronto tra alcune delle migliori sonde "power rail" di diverse aziende, attraverso parametri comuni ai loro datasheet [22] [23] [38] [39].

Nella Tab. 7 sono state confrontate 4 sonde power-rail di aziende diverse attraverso banda passante, intervallo di offset, intervallo d'input e attenuazione. Si nota che l'unico valore che si discosta dagli altri riguarda l'intervallo di offset della sonda Keysight N7024A, il quale risulta essere significativamente inferiore rispetto allo stesso parametro delle altre sonde.

Questo tipo di sonde hanno un prezzo minimo di circa 4500 €(Keysight N7020A), fino ad arrivare a quasi 12000 €(Keysight N7024A) [40] [41].

4.7 Analisi delle sonde logiche

Le sonde logiche, come quella rappresentata nella Fig. 21, sono usate per determinare gli stati logici (alto/vero = 1, basso/falso = 0) dei segnali digitali. Per verificare ed eseguire il debug dei segnali ad alta velocità e bassa tensione è necessario utilizzare sonde che possono acquisire segnali da un'ampia varietà di design elettronici, garantendo allo stesso tempo la fedeltà del segnale di partenza.



Figura 21: Sonda logica Yokogawa 701989 [34].

	Yokogawa 701989	Tektronix TLP058
Canali d'ingresso	8	8
Tensione di soglia [V]	± 6 V con risoluzione 0.05 V	± 40 V
Massima frequenza di commutazione [Hz]	250 MHz	500 MHz
Impedenza d'ingresso [Ω , F]	100 k Ω , 3 pF	100 k Ω , 3 pF

Tabella 8: Confronto tra alcune delle migliori sonde logiche di alcune aziende, attraverso parametri comuni ai loro datasheet [34] [42].

Nella Tab. 8 sono state confrontate 2 sonde logiche attraverso canali d'ingresso, tensione di soglia, massima frequenza di commutazione e impedenza d'ingresso. L'unica grande differenza tra le due si osserva dalla tensione di soglia della sonda Yokogawa 701989, la quale è molto inferiore alla tensione di soglia della sonda Tektronix TLP058.

Queste sonde partono da un prezzo base di circa 1000 €(Tektronix P6316), fino ad un prezzo che si aggira sui 2500 €(Tektronix TLP058) [43].

4.8 Analisi delle sonde isolate a fibra ottica ad alto voltaggio

La sonda isolata a fibra ottica ad alto voltaggio HVFO108 riportata nella Fig. 22, con 150 MHz di banda è utilizzabile per design in Silicio e in Carburo di Silicio (SiC). E' stata creata per misurare piccoli segnali su di un bus ad alto voltaggio e offre ottime prestazioni, ha un alto rapporto di reiezione di modo comune (CMRR) e offre un isolamento ottico per ridurre il comportamento da carico degli strumenti di misura durante il loro utilizzo [44].



Figura 22: Sonda ad alto voltaggio isolata a fibra ottica Teledyne LeCroy HV-FO108 [44].

	Teledyne LeCroy HVFO108
Banda passante [Hz]	150 MHz
Tempo di salita [s]	3.3 ns
Rapporto di reiezione di modo comune [dB]	140 dB (100 Hz), 120 dB (fino a 1 MHz), 85 dB (fino a 10 MHz), 60 dB (fino a 60 MHz), 35 dB (fino a 150 MHz)
Intervallo di tensione di modo comune [V]	± 35 kV (DC + picco AC)
Massima tensione d'ingresso a massa [V]	± 35 kV (DC + picco AC)
Massima tensione d'ingresso sicura [V]	30 V (efficaci), 60V in DC
Sensibilità [V/div]	dipendente dalla punta (con punta 10X, da 100 mV/div a 10 V/div)
Impedenza d'ingresso [Ω , F]	dipendente dalla punta (con punta 10X, 23 pF e 10 M Ω)

Tabella 9: Parametri principali della sonda isolata a fibra ottica ad alto voltaggio Teledyne LeCroy HVFO108 [44].

Nella Tab. 9 sono riportati tutti i parametri fondamentali della sonda Teledyne LeCroy HVFO108 come: banda passante, tempo di salita, rapporto di reiezione di modo comune, intervallo di tensione di modo comune, massima tensione d'ingresso a massa, massima tensione d'ingresso sicura, sensibilità e impedenza d'ingresso.

4.9 Analisi delle sonde TriMode

Le sonde Tektronix TriMode, come quella rappresentata in Fig. 23, serie P7700, e serie TDP7700, sono state progettate per effettuare misurazioni di tipo differenziale, di modo comune e single-ended senza cambiare i punti di collegamento della sonda. Questa peculiarità permette di essere più efficienti nelle misurazioni, in quanto si possiedono 3 opzioni ogni volta che si effettua una misurazione.



Figura 23: Sonda TriMode Tektronix [45].

	Tektronix TDP7710
Banda passante [Hz]	10 GHz
Tempo di salita [s]	minore di 45ps
Rapporto di reiezione di modo comune minimo [dB]	per frequenze minori di 50 MHz sono 34 dB, tra 50 e 800 MHz sono 24 dB, tra 800 MHz e 4 GHz sono 14 dB, tra 4 e 10 GHz sono 10 dB
Intervallo di tensione operativo [V]	dipende dalla punta (con punta attiva ± 5.25 V)
Intervallo di tensione d'ingresso differenziale [V]	dipende dalla punta (con punta attiva ± 5 V)
Resistenza d'ingresso in DC [Ω]	dipende dalla punta (con punta attiva 100 k Ω)
Risposta in frequenza a piccolo segnale [Hz]	maggiore di 10 GHz

Tabella 10: Parametri principali della sonda Tektronix TriMode TDP7710 [45].

Nella Tab. 10 sono stati riportati i parametri principali della sonda Tektronix TDP7710 come: banda passante, tempo di salita, rapporto di reiezione di modo comune minimo, intervallo di voltaggio operativo, intervallo di voltaggio d'ingresso differenziale, resistenza d'ingresso in corrente continua e risposta in frequenza a piccolo segnale.

Queste sonde partono da un prezzo di 10000 €(Tektronix TDP7704), fino ad arrivare anche a circa 32000 €(Tektronix P7720) [46].

4.10 Analisi delle sonde attive InfiniiMax Ultra

Le sonde Keysight InfiniiMax, come quella riportata in Fig. 24, offrono molto in quanto a performance, come l'abilità di rappresentare il segnale più realmente possibile attraverso un rumore quasi inesistente. Queste sonde offrono una vasta gamma che varia dai 10 ai 25 GHz di banda passante, inoltre offrono la più alta impedenza per le frequenze di banda intermedia (midband), la quale è cruciale per misurare in modalità ad alta impedenza.

Per quanto riguarda l'utilizzo, queste sonde hanno l'opzione di effettuare misurazioni differenziali, single-ended e di modo comune con un'unica punta della sonda (InfiniiMode) [47].



Figura 24: Sonda InfiniiMax Ultra [47].

	Sonda InfiniiMax Ultra
Banda passante [Hz]	dipende dall'accessorio della punta
Resistenza d'ingresso in DC [Ω]	50 k Ω per misure differenziali
Intervallo di tensione d'ingresso [V]	dipende dall'attenuazione (con attenuazione 4:1, 2.5 V picco \pm 1.25 V)
Massimo Slew Rate [V/s]	40 V/ns per misure differenziali
Rapporto di attenuazione in DC	1:1, 4:1, 7.6:1

Tabella 11: Parametri principali dell'amplificatore della sonda InfiniiMax Ultra con punta da 25 k Ω [47].

Nella Tab. 11 si possono osservare i parametri principali della sonda InfiniiMax Ultra come: banda passante, resistenza d'ingresso in corrente continua, intervallo di tensione d'ingresso, massimo slew rate e rapporto di attenuazione in corrente continua.

Queste sonde partono da un prezzo di 13500 €(Keysight MX0020A) fino ad arrivare a 35000 €(Keysight MX0025A) [48] [49].

4.11 Analisi delle sonde attive InfiniiMode

Questa categoria di sonde, di cui fa parte quella riportata nella Fig. 25, offre modelli con banda passante di 1.5, 3.5 e 6 GHz con un doppio rapporto di attenuazione (2:1, 10:1). Per quanto riguarda la parte resistiva dell'impedenza d'ingresso, è 200 k Ω nel caso di misure differenziali e 100 k Ω nel caso di misure single-ended. L'intervallo dinamico d'ingresso è di 10 V (picco-picco) con un intervallo di offset di ± 15 V. Queste sonde offrono un alto rapporto di reiezione di modo comune (> 60 dB a 1 MHz). In queste sonde è presente la funzione InfiniiMode che permette di effettuare misurazioni differenziali, single-ended e di modo comune con un'unica sonda. Concludendo, queste sonde possiedono l'interfaccia AutoProbe per la configurazione automatica con gli oscilloscopi Keysight Infiniium [22].



Figura 25: Sonda attiva InfiniiMode N2751A [22].

	Sonda InfiniiMode N2751A
Banda passante [Hz]	3.5 GHz
Tempo di salita [s]	100 ps
Resistenza d'ingresso in DC [Ω]	dipende dalla modalità (200 k Ω in modalità differenziale)
Capacità d'ingresso	700 fF
Attenuazione	2:1, 10:1

Tabella 12: Parametri principali della sonda InfiniiMode N2752A [9].

Nella Tab. 12 riportata sopra sono riportati i parametri principali della sonda InfiniiMode N2751A come: banda passante, tempo di salita, resistenza d'ingresso in corrente continua, capacità d'ingresso e attenuazione.

Queste sonde partono da un prezzo di 5000 €(Keysight N2750A), fino ad arrivare a 9000 €(Keysight N2752A) [50] [51].

Conclusioni

Il presente studio ha messo in luce la tecnica di progettazione delle sonde, applicata da ogni azienda analizzata. Questo studio ha permesso, oltre al punto precedente, la creazione di un documento con tutte le informazioni necessarie per prendere una decisione solida in caso di acquisto di una sonda di tensione.

Per quanto riguarda le sonde passive si possono notare delle performance molto simili tra sonde di aziende differenti. Un parametro da sottolineare per queste sonde è l'elevato massimo input che varia dai 400 V ai 500 V.

Le sonde attive hanno performance variabili tra aziende diverse. La sonda Yokogawa 700939 è l'unica, tra quelle analizzate, ad avere una banda passante inferiore ai GHz. La sonda Tektronix P7240 è l'unica, tra quelle analizzate, ad utilizzare l'attenuazione 5:1 a differenza delle altre che utilizzano 10:1. Un'osservazione interessante può essere fatta per l'impedenza di input e l'intervallo di input, i quali sono molto diversi tra aziende.

Anche per le sonde differenziali si è notata una grande differenza di performance tra aziende. La banda passante delle sonde Teledyne LeCroy D620APB2 e Rohde-Schwarz RT-ZD40 è nettamente superiore a quella delle altre sonde analizzate. L'input differenziale delle sonde Keysight N2819A e Yokogawa 701925 è superiore alla concorrenza.

La sonda Tektronix TDP7710 primeggia su tutte le sonde analizzate in quanto a banda passante (10 GHz) e tempo di salita, il quale per questa sonda è inferiore ai 45 ps, nettamente superiore a qualsiasi tempo di salita di una sonda general purpose.

Uno dei problemi riscontrati durante la realizzazione di questo documento è la quantità di sonde presenti sul mercato. Quest'ultimo è stato risolto effettuando una selezione tra le aziende produttrici di sonde. Un altro problema è stato quello dei parametri unici ad un unico datasheet di un'azienda. Questo problema è stato risolto utilizzando solamente parametri comuni ai datasheet di tutte le sonde confrontabili tra loro.

Un'evoluzione di questo documento potrebbe partire dall'inclusione delle sonde di corrente. Altro spunto interessante per ampliare questo studio, potrebbe essere quello di analizzare sonde differenziali nel campo degli azionamenti elettrici in applicazione al settore automotive.

Riferimenti bibliografici

- [1] J. Webster, *Measurement, instrumentation, and sensors*. CRC Press LLC, 1999.
- [2] “Healthy Food Near Me.” (), indirizzo: <https://healthy-food-near-me.com/wp-content/uploads/2022/08/basic-units-of-measurement-of-physical-quantities-si.png>.
- [3] *Probing is everything*, 7120-1246.EN, Keysight, set. 2020.
- [4] *Becoming Familiar with Your Standard Oscilloscope Probe*, 5992-2121EN, Keysight, mar. 2021.
- [5] M. Bertocco e A. Sona, *Introduzione alle misure elettroniche*. Lulu, 2010.
- [6] R. Schwarz. “Comprendere la compensazione delle sonde.” (), indirizzo: https://www.rohde-schwarz.com/it/prodotti/misura-e-collauda/essentials-test-equipment/digital-oscilloscopes/comprendione-compensazione-sonda_254520.html.
- [7] T. LeCroy. “Application Note AN016 - Probes and Probing.” (), indirizzo: <https://www.teledynelecroy.com/doc/probes-probing>.
- [8] *Oscilloscope Probes and Accessories*, 5989-6162EN, Keysight, set. 2021.
- [9] *InfiniiVision Oscilloscope Probes and Accessories*, 5968-8153EN, Keysight Technologies, giu. 2023.
- [10] *Agilent Technologies 6000 and 54600 Series Oscilloscope Probes and Accessories*, 5968-8153EN, Agilent Technologies, ott. 2005.
- [11] *R&S RT-Zxx STANDARD PROBES*, PD 3607.3851.22, Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, set. 2022.
- [12] *500 MHz Passive Probes - P6139B and P5050B Datasheet*, 51W-26150-6, Tektronix, mar. 2023.
- [13] *PP007-WR PP007-WS Passive Probes*, pp007-ds-25feb15, Teledyne LeCroy, feb. 2015.
- [14] *Accessories for DLM3000/5000 series - Miniature Passive Probe 701949*, LF 701949-01EN, Yokogawa, mar. 2023.
- [15] Tektronix. “Passive Probe.” (), indirizzo: <https://www.tek.com/en/products/oscilloscopes/oscilloscope-probes/passive-probe>.
- [16] Yokogawa. “701944 High Voltage Passive Probe 1000Vrms / 400 MHz.” What is the function of a high voltage probe ? (), indirizzo: <https://tmi.yokogawa.com/solutions/products/accessories/probes/701944-1001-probe/>.

- [17] *Passive High Voltage Probes - P5100A-TPP0850-P5122-P5150-P6015A Datasheet*, 56W-10262-15, Tektronix, ott. 2023.
- [18] *R&S RT-Zxx HIGH VOLTAGE AND CURRENT PROBES*, PD 5214.2362.22, Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, nov. 2023.
- [19] *High Voltage Passive Probes PPE6KV-A HVP120*, high-voltage-passive-probes-ds-21jan22, Teledyne LeCroy, gen. 2022.
- [20] R. Schwarz. “Active differential probes for oscilloscopes.” Brief description. (), indirizzo: https://www.rohde-schwarz.com/it/prodotti/misura-e-collaudo/sonde-per-oscilloscopi/active-differential-probes-for-oscilloscopes_63493-73795.html.
- [21] *Accessory for DLM series PBDH0500 - Differential Probe 701925 (500 MHz)*, LF 701925-01EN, Yokogawa, mar. 2023.
- [22] *Infiniium Oscilloscope Probes and Accessories*, 5968-7141EN, Keysight Technologies, mar. 2023.
- [23] *R&S RT-ZXX HIGH BANDWIDTH PROBES*, PD 3607.3868.22, Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, set. 2022.
- [24] *Differential Probes - TDP1500, TDP3500 and TDP4000 Datasheet*, 51W-20565-9, Tektronix, mar. 2021.
- [25] *WaveLink Differential Probe System (4 GHz - 6 GHz)*, wavelinklowspeeds-ds-19oct20, Teledyne LeCroy, ott. 2020.
- [26] *High-voltage Differential Probes TMDP0200 - THDP0200 - THDP0100 - P5200A - P5202A - P5205A - P5210A*, 51W-11195-15, Tektronix, gen. 2023.
- [27] *High Voltage Differential Probes HVD3605A HVD3220 HVD3206A HVD310xA*, hvd3000a-probes-ds-14jan21, Teledyne LeCroy, gen. 2021.
- [28] *Accessories for DLM series - High Voltage Differential Probe 701977 (7000 Vpeak, 50 MHz) 701978 (1500 Vpeak, 150 MHz)*, LF 701977-01EN, Yokogawa, mar. 2023.
- [29] Keysight. “N2791A High-Voltage Differential Probe, 25 MHz.” (), indirizzo: <https://www.keysight.com/us/en/product/N2791A/high-voltage-differential-probe-25-mhz.html>.
- [30] Tektronix. “High Voltage Differential Probes.” (), indirizzo: <https://www.tek.com/en/products/oscilloscopes/oscilloscope-probes/high-voltage-differential-probes>.
- [31] T. LeCroy. “Active Voltage Probes.” (), indirizzo: <https://www.teledynelecroy.com/probes/active-voltage-probes>.
- [32] *4 GHz Active Probe - P7240 Datasheet*, 51W-26152-7, Tektronix, feb. 2023.

- [33] *ZS Series High Impedance Active Probes 1 GHz - 4 GHz Probes*, zsprobes-ds-13nov13, Teledyne LeCroy, nov. 2013.
- [34] *Precision waveform measurement essentials – Probes and accessories for oscilloscopes*, Bulletin Waveform-Acc-01EN, Yokogawa, gen. 2022.
- [35] Keysight. “N2795A Active Probe, 1 GHz.” (), indirizzo: <https://www.keysight.com/us/en/product/N2795A/active-probe-1-ghz.html>.
- [36] Keysight. “1134B InfiniiMax Probe, 7 GHz.” (), indirizzo: <https://www.keysight.com/us/en/product/1134B/infiniimax-probe-7-ghz.html>.
- [37] Tektronix. “Power Rail Probes.” Why use a power rail probe over a passive or differential probe ? (), indirizzo: <https://www.tek.com/en/products/oscilloscopes/oscilloscope-probes/power-rail-probes>.
- [38] *Active Power Rail Probes - TPR1000 and TPR4000 Datasheet*, 51W-61491-5, Tektronix, feb. 2023.
- [39] *Active Voltage Rail Probes RP2060/RP4060*, active-voltage-rail-probe-ds-11nov22, Teledyne LeCroy, nov. 2022.
- [40] Keysight. “N7020A Power Rail Probe, 2 GHz.” (), indirizzo: <https://www.keysight.com/us/en/product/N7020A/power-rail-probe-2-ghz.html>.
- [41] Keysight. “N7024A Power Rail Probe, 6 GHz.” (), indirizzo: <https://www.keysight.com/us/en/product/N7024A/power-rail-probe-6-ghz.html>.
- [42] *TLP058 FlexChannel Logic Probe Instructions*, 071-3515-03, Tektronix, ago. 2021.
- [43] Tektronix. “Logic Probe.” (), indirizzo: <https://www.tek.com/en/products/oscilloscopes/oscilloscope-probes/logic-probe>.
- [44] *HVFO108 High Voltage Fiber Optically-isolated Probe*, hvfo-probes-ds-02jun20, Teledyne LeCroy, giu. 2020.
- [45] *TriMode Probe Family - TDP7000 Series TriMode Probes Datasheet*, 51W-61352-5, Tektronix, apr. 2023.
- [46] Tektronix. “Low Voltage Differential Oscilloscope Probes.” (), indirizzo: <https://www.tek.com/en/products/oscilloscopes/oscilloscope-probes/low-voltage-differential-probes>.
- [47] *InfiniiMax Ultra Series Probes and Accessories*, 3121-1293.EN, Keysight Technologies, set. 2021.
- [48] Keysight. “MX0020A InfiniiMax Ultra Probe Amplifier, 10 GHz.” (), indirizzo: <https://www.keysight.com/us/en/product/MX0020A/infiniimax-ultra-probe-amplifier-10-ghz.html>.

- [49] Keysight. “MX0025A InfiniiMax Ultra Probe Amplifier, 25 GHz.” (), indirizzo: <https://www.keysight.com/us/en/product/MX0025A/infiniimax-ultra-probe-amplifier-25-ghz.html>.
- [50] Keysight. “N2750A InfiniiMode Active Differential Probe, 1.5 GHz.” (), indirizzo: <https://www.keysight.com/us/en/product/N2750A/infiniimode-active-differential-probe-1-5-ghz.html>.
- [51] Keysight. “N2752A InfiniiMode Active Differential Probe, 6 GHz.” (), indirizzo: <https://www.keysight.com/us/en/product/N2752A/infiniimode-active-differential-probe-6-ghz.html>.